

Des Jumeaux Inseparables -Dialogue avec Alain Aspect-

Víctor Gómez Pin

Universidad Autónoma de Barcelona

Abstract. *Inseparable twins - Dialogue with Alain Aspect -*

During the 3rd edition of the International Ontology Congress, celebrated on October 2002, the physic Alain Aspect realized in front of eminent scientists from all the world a conference about the philosophical implications of his well-known experiment. The text of Alain Aspect was already published by Ontology Studies / Cuadernos de Ontología (First Series). In order to complement the rigorously technical Doctor Aspect's analysis, Víctor Gómez Pin maintained in the Parisian laboratory Institut d'Optique at Orsay a large colloquy with the scientist where the more ontological perspective is empathized. We synthesized it here in his original language.

Key words: quantum mechanics, quanta, quantum, Aspect, Bell's theorem, continuity, contiguity, discret

Resumen. *Gemelos inseparables - Diálogo con Alain Aspect -*

Durante la tercera edición del International Ontology Congress, celebrada en octubre de 2002, el físico Alain Aspect realizó en presencia de eminentes científicos del mundo entero una conferencia sobre las implicaciones filosóficas de su célebre experimento. El texto de Alain Aspect fue publicado en su día en Ontology Studies / Cuadernos de Ontología (primera época). Con vistas a complementar el análisis rigurosamente técnico del doctor Aspect, Víctor Gómez Pin mantuvo en el laboratorio parisino del Institut d'Optique at Orsay un largo coloquio con el científico en el que se enfatizan los aspectos más directamente ontológicos. Lo sintetizamos aquí en la lengua original en que fue mantenido.

Key words: mecánica cuántica, cuanto, quantum, Aspect, teorema de Bell, continuidad, contigüidad, discreto.

Víctor Gómez Pin. - Quelques points de repère historiques pour commencer. L'on sait que Bohr est devenu rapidement conscient de la nécessité de se doter d'un ensemble de catégories qui puisse octroyer une intelligibilité à la théorie quantique et que cette exigence se trouve à l'origine de ce qu'on appelle l'Interprétation de Copenhague. Cette interprétation introduisait deux principes: celui de la complémentarité et celui de la prééminence classique dans l'acte d'établir la mesure.

Un second pas important dans la métathéorie est, peut-être, celui de J. Von Neumann (dans la filière du développement du formalisme mathématique de la théorie avec les

travaux de P.A.M. Dirac). Le changement qui a brusquement lieu, le collapse de la fonction d'onde en raison de l'acte de mesurer (ce qui laisse entrevoir que l'appareil de mesure est, quelque part, en interaction avec le syst'eme quantique) trouve une explication formelle sur la base d'un syst'eme de postulats.

D'une certaine mani'ere les interpr'etations de Von Neumann et celle de Copenhague seraient p'edagogiquement compl'mentaires, puisqu'on pourrait enrichir le formalisme de la premi'ere avec les "explications" plus imag'ees de la seconde.

D'autre part Von Neumann cherche 'a 'etablir ce qu'on pourrait appeler le premier th'eor'eme d'impossibilit' des variables cach'ees, ainsi qu'un th'eor'eme de consistance formelle visant 'a montrer la solidit' de sa propre interpr'etation.

Alain Aspect.- Von Neumann croyait avoir d'monstr' l'impossibilit' des variables cach'ees, et, en fait, on sait aujourd'hui que le th'eor'eme de Von Neumann 'etait faux. Et, ce qui est int'essant c'est que c'est John Bell lui-m'eme qui a d'monstr' que le th'eor'eme de Von Neumann 'etait faux. Et c'est en r'efl'chissant 'a ce th'eor'eme de Von Neumann que John Bell a pu faire la d'marche qui l'a conduit 'a son propre th'eor'eme. C'est assez int'essant sur le plan historique.

V.- D'accord. Bell con'ut de se servir de la variante de Bohm dans le dessein d'Einstein-Podolsky-Rosen concernant la preuve de l'incompl'tude, dont la r'ponse d'epend pr'cis'ment de s'il peut ou pas exister un mod'ele de variables cach'ees pour le syst'eme 'a 'tudier. L'on sait que Bell 'etablit que n'importe quel mod'ele satisfaisant les conditions de localit', de r'alisme et de d'terminisme (d'finies dans les termes le plus g'n'riques) se devrait de satisfaire une in'galit' constitu'ee par les corr'lations statistiques mesur'ees pour n'importe quelle combinaison de couples d'orientations. Les pr'dictions de la m'canique quantique supposent une violation de cette in'galit', tout au moins pour quelques unes des 'lections possibles dans l'orientation des d'tecteurs de spin ou, en tout cas, de la polarisation. La violation des in'galit's suppose que l'une au moins des pr'misses qui supportent le mod'ele est fausse. Avec ces r'sultats est exclue une th'eorie des variables cach'ees classique ou einsteinienne et les th'eories contextuelles qui pourraient suivre le feraient au prix -'lev'!- de violer la relativit' sp'ciale.

Les discussions en m'canique quantique ont 'et' souvent centr'ees sur ce probl'eme de la compl'tude, souvent abord' par le biais de la question des 'ventuelles variables cach'ees. On peut dire que, d'une certaine mani'ere, c'est le seul John Bell qui a pu sortir la question d'un certain mar'ecage conceptuel. A tous ceux qui d'fendaient la compl'tude, Bell reprocha de ne pas rendre l'importance due au fait capital de la d'ependance des r'sultats des mesures par rapport 'a l'appareil de mesure lui m'eme. Toutes les preuves de l'impossibilit' des variables cach'ees supposaient 'a un niveau ou 'a un autre la comparaison d'observables qui, en fait, ne sont pas compatibles.

A.- Oui, John Bell a surtout rendu le problème scientifique, à mon sens; c'est-à-dire qu'une question scientifique c'est une question à laquelle on peut apporter une réponse, et le mérite essentiel du travail de John Bell c'est qu'il a réussi à montrer qu'il existait une réponse expérimentale à la question; qu'en principe on pouvait répondre par une expérience à la question posée. Donc, en ce sens, il a fait effectivement énormément évoluer le problème.

V.- C'est-à-dire, pour avoir recours à une expression célèbre: il aurait laissé la porte ouverte à une philosophie expérimentale.

A.- Oui, j'accepte volontiers ce terme.

V.- Question, pour ainsi dire, préalable: au cœur des controverses concepts concernant vos travaux, il y a les problèmes du réalisme et de la séparabilité. Ces concepts ont souvent été employés d'une façon assez vague. Il convient donc, peut-être, de se mettre d'accord. Qu'est-ce qu'on entend par réalisme? Kant entendait certainement par réalisme une chose différente que, par exemple, un aristotélicien. On pourrait dire en ce qui nous concerne: on postule que tout système a un ensemble de propriétés et que celles-ci lui appartiennent même si elles ne sont pas saisies par un sujet connaissant.

A.- Oui, moi personnellement je suis convaincu par cette définition; il faut bien comprendre que je ne suis pas philosophe et que donc je réponds avec ce qu'on appelle la philosophie «spontanée», donc probablement beaucoup trop naïve au sens d'un philosophe. Mais, néanmoins, de façon naïve et spontanée je réponds; oui, c'est ma conception du réalisme. Je crois que le réalisme c'est l'idée que, effectivement, les systèmes ont des propriétés indépendamment du fait qu'on les observe ou qu'on ne les observe pas. Alors toute la question c'est de savoir que veut dire propriété.

V.- Venons à la séparabilité. Les choses réelles ont droit à être considérées comme distinctes (indivisées en elles-mêmes et divisées par rapport aux autres – ce qui n'exclut pas la contiguïté) et localisées. Elles peuvent bien sûr venir à se trouver en interaction, mais cette interaction ne leur est pas intrinsèque et, quand elle se produit, elle est limitée par l'impossibilité (dans le cadre d'Einstein) de dépasser, dans la communication, la vitesse de la lumière.

A.- Oui, je pense que c'est important... Alors, bien sûr qu'on va avoir tout un problème à la fin de toute cette histoire. Ceci a l'air extrêmement raisonnable, et bien, on voit que cela entraîne un défaut à un certain moment. C'est vrai que, à priori, on voit mal comment on peut faire, par exemple, de la physique si on n'a pas de séparabilité, parce que, comment est-ce que je peux parler de l'étude de l'objet si déjà je n'admets pas que cet objet est séparé, comme vous l'avez dit, du reste du monde? Il faut au moins que je puisse me dire que cet objet interagit avec le reste du monde, mais par une interaction que je vais pouvoir imaginer

venant du reste du monde et allant vers cet objet. Si je ne peux pas imaginer l'objet séparé, au moins de façon abstraite, du reste du monde, je ne vois même pas comment je peux faire de la physique sur cet objet.

V.- Aristote distinguait entre le continu, le contigu, et le consécutif; il formulait implicitement, en différentes voies, ce que l'on pourrait appeler le principe de contiguïté (ou continuité-contiguïté), susceptible d'être énoncé de cette manière:

Une substance A ne peut avoir une influence sur une substance B que dans les deux cas suivants:

-ou bien les bords d'A et B ont des points de contact et l'influence est directe.

-ou bien les bords d'A et B n'ont pas de points de contact mais il existe une succession de substances A', A'', etc. (réduites éventuellement à une seule), dont la première est en contact avec A et la dernière l'est avec B, étant chacune d'elles en contact avec la suivante.

Ce qui est exclu par le principe de contiguïté c'est l'influence sans contact direct ou indirect, c'est-à-dire l'action à distance. D'où que le principe puisse être appelé principe de localité.

A.- Alors, naturellement, on sait bien que tout ça a l'air extrêmement naturel et tout le fond de l'histoire c'est qu'il y a des expériences où le monde a l'air de ne pas obéir à ces choses là.

V.- Et bien: il arrive souvent que les personnes s'intéressant de dehors (mais, parfois, avec une disposition qui dépasse de beaucoup la simple curiosité) à la mécanique quantique croient que réalisme et séparabilité étaient déjà démolis par la mécanique quantique pour ainsi dire classique (école de Copenhague plus Von Neumann), comme quoi on ne verrait pas trop la transcendance de votre expérience et même du théorème de Bell. Pourriez-vous démêler cette équivoque? En somme: pourquoi avant votre expérience, quoique l'on pensât, on pouvait au fond demeurer praticien de la mécanique quantique et à la fois, réaliste et localiste ?

A.- Qu'est-ce que je peux dire là-dessus? Il me semble évident qu'avant John Bell, effectivement, on n'avait pas du tout établi l'incompatibilité entre ce qu'on va appeler la séparabilité, une vision réaliste et séparable du monde (pour caricaturer, je peux dire que c'était la vision d'Einstein) et puis la vision de Copenhague. Certes, ces deux visions étaient opposées (on va parler de Bohr et d'Einstein pour personnaliser les choses). Il y avait donc le formalisme de la mécanique quantique; Einstein ne le remettait pas en cause. Puis, pour avoir une interprétation, disons, épistémologique, de ce formalisme, Bohr avait développé ce qu'on appelle l'interprétation de Copenhague: mais Einstein soutenait qu'il y avait une autre interprétation qui était une interprétation réaliste et locale de ce formalisme. Et je crois que, jusqu'au théorème de Bell, on peut honnêtement dire qu'on pouvait logiquement

soutenir le point de vue d'Einstein; c'est-à-dire, soutenir le point de vue que les prévisions de la mécanique quantique étaient compatibles avec une conception réaliste et séparable du monde. Alors, ce qu'il faut ajouter quand même, c'est que je pense que Niels Bohr avait l'intuition profonde qu'il y avait une incompatibilité; mais, cette incompatibilité, ni lui, ni Von Neumann, ni personne d'autre n'a -à ma connaissance- réussi à la formaliser avant John Bell. Mais je pense, quand même, que quand on lit tout ce que Bohr a essayé de dire avec de très, très grande bonne foi (c'est-à-dire que quand Niels Bohr argumentait avec Einstein, il argumentait vraiment de bonne foi et il y a de très nombreux textes de Niels Bohr où cela se fait évident), je crois que Niels Bohr ressentait de façon intuitive, au fond de lui, très profondément, qu'il y avait une incompatibilité entre les prévisions, c'est-à-dire, le formalisme de la mécanique quantique et les concepts épistémologiques d'Einstein. Mais il n'a jamais réussi à formaliser cette incompatibilité et c'est vraiment et incontestablement John Bell qui a réussi. Donc, je me fais bien comprendre. Il y a le formalisme sur lequel tout le monde est d'accord et il y a une interprétation qui est l'interprétation de Copenhague, qui est certes très majoritaire dès les années 1930-1935. Mais il y a Einstein de l'autre côté qui peut légitimement et logiquement soutenir que, lui, il a une autre interprétation du formalisme de la mécanique quantique. Et il fait même un pas de plus (j'espère qu'on va revenir à Einstein): partant des prévisions qui sont faites dans le cadre même de ce formalisme de la mécanique quantique, il va même aller jusqu'à la conclusion qui est justement à l'opposé de celle de Bohr; c'est-à-dire que Einstein va montrer que, à cause de la prévision de ces fortes corrélations par le formalisme, la seule façon raisonnable d'interpréter ces corrélations c'est de compléter la mécanique quantique.

V.- Parmi les critiques à vos conclusions (impossibilité de la séparabilité einsteinienne dans la fidélité à l'impossibilité de la vitesse supraluminale), l'une des plus constantes est celle qui insiste dans la possibilité d'un mécanisme déterministe (Einstein, local et séparable) qui expliquerait les conclusions trouvées (ces modèles prennent en ligne de compte le cas de couples de photons lancés dans une direction quelconque). Quelle serait, en synthèse, votre réponse à ces critiques?

A.- Je crois que ces critiques utilisent tout simplement une inefficacité, une limitation actuelle des détecteurs qui sont utilisés dans ces expériences. Les détecteurs qui sont utilisés dans ces expériences n'ont pas une efficacité de cent pour cent. Donc il existe un certain nombre de paires de photons qui ne sont pas détectés; et ceci laisse la porte ouverte, d'un point de vue logique, à une espèce de modèle dans lequel il y aurait conspiration de la nature, qui utiliserait cette faille pour mimer, pour simuler la mécanique quantique avec une théorie locale à variables cachées. Alors, pour porter un jugement sur ces critiques, je crois premièrement qu'on peut dire que, en logique pure, aujourd'hui ces gens là ont parfaitement le droit de défendre leur position; mais, je pense que leur position est extrêmement fragile pour une raison qui a été donnée de façon très claire par John Bell. C'est la suivante: si

ces gens là avaient raison, le jour où nous allons améliorer l'efficacité des détecteurs il va arriver un moment où, d'un seul coup, les résultats de la physique auront tous changé. Or, il n'y a aucune loi physique qui empêche les détecteurs d'avoir des rendements meilleurs; et je dois même dire que, tous les ans, les détecteurs s'améliorent. Donc, on peut dire sans risque de se tromper que, d'ici à moins de cinq ans, nous aurons des expériences qui pourront trancher; et, comme l'a dit John Bell, on ne voit pas comment les résultats d'une expérience pourraient, d'un seul coup, changer qualitativement, changer de nature, simplement parce que le rendement d'un détecteur est passé de 30% à 40%. Donc, en toute logique ces gens n'ont pas tort, mais, de toute façon, avant que nous soyons morts -et j'espère qu'on ne va pas mourir trop vite-, mais, je veux dire que, à l'échelle de la décennie, on est à peu près sûr de toute façon qu'il y aura une réponse expérimentale à cette question; mais, comme la modification expérimentale c'est juste d'augmenter quantitativement les détails de l'expérience, ce n'est pas de changer radicalement le schéma de l'expérience, c'est juste améliorer quelque chose dans un point de l'expérience, ce serait extraordinaire que simplement en améliorant l'efficacité d'un détecteur, en partant de quelque chose qui était en accord avec la mécanique quantique, d'un seul coup ça ne se trouverait plus en accord avec la mécanique quantique; ce serait un changement formidable dans le résultat. John Bell a dit que si on passe d'une expérience suivant un certain schéma à une expérience beaucoup plus évoluée, beaucoup plus sophistiquée, basée sur un autre schéma, il peut comprendre que la première donne un résultat d'un certain type, par exemple en accord avec la mécanique quantique, et que la deuxième, beaucoup plus sophistiquée, beaucoup plus élaborée, donne un résultat qui n'est pas en accord avec la mécanique quantique. Mais quand le schéma expérimental est simplement améliorer un peu l'appareil dans un point, penser qu'on va comme ça changer les résultats, ça, John Bell trouvait que c'était irraisonnable d'imaginer un procès pareil. Néanmoins, en logique pure, cette hypothèse est tenable...

Nous allons quand même entre nous, si vous voulez bien, pour la suite de l'exposé, faire l'hypothèse que les expériences futures continueront à donner un résultat en accord avec la mécanique quantique et qui viole les inégalités de Bell. D'accord?

V.- D'accord.

A.- Ce qui est quand même de loin le plus probable si on regarde la qualité des expériences qu'ont été faites à ce jour; je vous rappelle par exemple, je ne sais pas si on en reviendra, que nous avons fait, il y a déjà une quinzaine d'années, une série d'expériences qui étaient déjà extrêmement précises, et il y a actuellement toute une nouvelle génération d'expériences bien améliorées, avec des spécificités expérimentales considérablement améliorées et, jusqu'au présent, toutes ces expériences confirment, et avec encore plus de précision, les résultats que nous avons trouvés il y a une quinzaine d'années, à savoir: excellent accord

avec la mécanique quantique et violation des inégalités de Bell. Donc, on va prendre ça comme acquis.

V.- Même du point de vue d'un profane, on a parfois l'impressions que les scientifiques ne se sont pas vraiment engagés d'une manière suffisamment décidée dans la recherche de théories de variables cachées (à moins que je me trompe et que l'on puisse dire que les tentatives de D. Bohm soient vraiment systématiques). Croyez-vous que, dans l'état des affaires, vaudrait-il encore la peine de s'engager davantage dans cette voie (variables cachées mais avec vitesse supraliminaires)?

A.- Oui. Deux choses: d'une part, je pense que les tentatives de Bohm et d'un certain nombre de gens, ne sont pas négligeables du tout; c'étaient des gens qui connaissaient très bien la théorie quantique et qui connaissaient très bien la physique théorique; qui ont fait des efforts tout à fait considérables. John Bell lui-même a énormément travaillé là dessus. Maintenant je pense qu'il n'y a pas lieu de critiquer l'ensemble de la communauté des physiciens qui a préféré de faire autre chose. En effet, l'ensemble de la communauté des physiciens s'est trouvé avec à sa disposition un outil extraordinaire qui est la théorie quantique; cet outil a permis, en bientôt quatre-vingt ans, d'accumuler un nombre de succès absolument phénoménaux, je veux dire que l'on explique ainsi la structure de la matière, on a découvert de choses si extraordinaires que le laser, le transistor, ... Il est normal que les physiciens à qui on avait donné un nouvel outil, un nouveau jouet extraordinaire qui est la mécanique quantique, l'immense majorité d'entre eux a voulu utiliser cet outil extraordinaire qu'on mettait à sa disposition; et puis un petit nombre d'entre eux ont questionné cet outil. Et puis, voilà, je trouve que c'est très bien. Pourquoi critiquer ou les uns ou les autres? Ça me semble extrêmement simple. Il ne faut jamais oublier une chose, c'est que s'il n'y avait pas eu toute cette accumulation de physique qui a été faite à l'aide de la mécanique quantique et où finalement la mécanique quantique s'est révélée un outil extraordinaire, à la fois de la compréhension du monde et de prévision de nouveaux phénomènes, on aurait quand même moins confiance en la mécanique quantique, car certes la mécanique quantique on peut d'un certain côté la questionner en tant que philosophe. Ce qui est tout à fait légitime, et vous êtes là pour ça, et je ne vais pas dire que ce n'est pas légitime; mais il y a aussi, de l'autre côté, l'évidence empirique que la mécanique quantique marche. En d'autres termes, on prouve le mouvement simplement en marchant. La mécanique quantique prouve le mouvement en marchant, quand même.

V.- Attention quand même au fétichisme des résultats de la mécanique quantique, alors que souvent les gens ne comprennent rien à la théorie elle-même, tout en restant bouche-bée devant ses effets; je ne trouve pas ça très «démocratique». Mais passons à une autre question. Dans l'une des interviews que l'on vous a fait concernant les raisons qui vous ont poussé à votre expériment tendant à prouver les inégalités de Bell, vous évoquiez des raisons aussi bien théoriques que pratiques. Si j'ai bien compris, pour ce qui est de

premières vous souhaitiez vous rapproches le plus possible de «l'expérience idéales» (Gedanken Experiment). Pourriez-vous expliciter davantage ce point?

A.- Habituellement, en physique on ne met pas en cause les principes de base. Tout le monde est d'accord sur les concepts théoriques et explicatifs dans lesquels on se place; à partir de là tout ce que je demande à une expérience c'est d'être efficace, d'atteindre son but; mais, même s'il y a dix étapes intermédiaires, aucun problème, je peux expliquer mes dix étapes intermédiaires à partir d'une théorie sur laquelle tout le monde est d'accord et je fais mon expérience et tout va bien. Ici la situation est différente: et ça c'est grâce à John Bell, une fois de plus. La situation, elle est que, en principe, nous faisons une expérience dont le résultat est significatif indépendamment d'une théorie pour l'interpréter. Autrement dit: une expérience de violation des inégalités de Bell, elle est destinée à tester toute une classe de théories qui sont définies par un petit nombre de postulats; elles sont réalistes, elles sont locales, mais elles ne sont pas spécifiées explicitement ces théories. Comme elles ne sont pas spécifiées explicitement, je ne peux pas m'en servir pour décortiquer les détails de l'expérience. Il faut donc que l'expérience soit aussi épurée que possible pour n'avoir pas la nécessité de recourir à une théorie pour passer des résultats expérimentaux au schéma idéal dont on part. Donc, il faut que l'expérience soit la plus proche possible au schéma de départ, puisque je n'ai pas à ma disposition des outils théoriques pour faire le lien entre les deux. Quand on a dit: je vais tester toutes les théories locales à variables cachées, ces théories ne sont pas capables de me donner une description précise de ce que fait un polariseur, par exemple.

Bon, je vais entrer en détail. Un polariseur idéal, il peut donner des résultats positifs; la polarisation est, on va dire, ordinaire ou extraordinaire. D'accord? Voilà le cas d'un polarisateur idéal. Le schéma idéal de l'expérience est basé là dessus.

Maintenant imaginons que j'ai un polariseur qui n'est pas très bon. Un polariseur qui n'est pas très bon, dans le contexte normal, si la lumière qui arrive dessus est dans la polarisation extraordinaire, il va me répondre «extraordinaire» dans 90% des cas, mais dans un 10% des cas il va se tromper, il va me dire «ordinaire». Quand je fais la physique habituelle avec un polariseur, même s'il n'est pas parfait, j'ai une théorie à ma disposition; c'est la théorie quantique, qui me permet de dire: bon, pour votre polariseur qui n'est pas parfait, voilà la prévision. Et cette prévision je peux la comparer à l'expérience; mais les théories à variables cachées, ce n'est pas une théorie particulière que je teste: c'est toutes les théories locales variables cachées, et l'ensemble de toutes ces théories à variables cachées ne me donne pas une description d'un polariseur imparfait. Donc, il faut que j'aie un polariseur parfait, parce qu'un polariseur parfait, lui, c'est 100% ou 0%; donc, lui, je peux lui faire correspondre l'ensemble de toutes les théories à variables cachées car, par définition, ces théories doivent me donner 0% ou 100%. Mais si, maintenant, j'ai un polariseur imparfait qui donne 90%-100%, il faut que j'aie une théorie particulière pour décrire l'imperfection de ce polariseur. Et, donc, je ne vais plus tester tout l'ensemble des

théories, mais je vais tester une seule théorie particulière. Donc, ce cas est beaucoup moins intéressant. D'où la nécessité d'avoir l'expérience la plus pure possible parce que, n'ayant pas de théorie pour décrire l'appareil particulier que j'ai devant moi, il faut que l'appareil soit idéal, qu'il ne donne que «oui» ou «non». Et alors, comme les théories que je teste elles aussi donnent «oui» ou «non», là je peux faire un test. Voilà donc la nécessité de faire des expériences les plus pures possibles.

V.- Question complémentaire: vous vous êtes, en quelque sorte, senti obligé à préciser que l'équipement qui a servi à vos tests est utilisable pour des objectifs autres que ceux dont on parle habituellement. Et, puisque vous avez fait allusion aux contribuables, on devrait comprendre que ces autres usages seraient davantage pratiques.

Il est vrai que la question des inégalités de Bell et leur violation paraît surtout un fascinant enjeu théorique... même si l'utilité pratique était nulle, l'intérêt pour l'esprit serait énorme. D'où la question: n'est-il pas nécessaire de revenir à une conception de la science comme essentiellement une exigence d'intelligibilité?

A.- Enfin, moi, ma position là dessus, elle est simple. La question qui m'a motivé au départ -et je pense que, quand on fait de la recherche fondamentale on est toujours dans cet état d'esprit- c'est vraiment pour la connaissance. Si on a la chance de pouvoir rencontrer un sujet qui va aborder de problèmes fondamentaux de connaissance c'est très bien, on peut dans le cadre universitaire de la recherche fondamentale, faire des études pour, uniquement, la connaissance pour la connaissance. Mais, en revanche, il y a un point sur lequel je suis catégorique; si en faisant ça je découvre que j'ai développé quelque chose qui peut avoir une utilité, je pense qu'il est de mon devoir de montrer que ça peut également servir à quelque chose. Si parmi les gens qui ont développé la mécanique quantique il n'y avait pas certains qui avaient découvert que, grâce à ça, on peut mieux comprendre la théorie des électrons dans les solides et faire des transistors, ou d'autres qui ont découvert qu'on pouvait bien comprendre l'émission stimulée et faire des lasers, là je pense qu'ils auraient eu tort. C'est-à-dire que je ne dis pas que la recherche fondamentale doit être pilotée par des applications; mais, en revanche, je pense que -en tout cas, en ce qui me concerne je suis catégorique- si, en faisant de la recherche fondamentale j'ai une idée d'application, c'est mon devoir, ne serait-ce que vis-à-vis des contribuables, de dire: attention!, ici il y a des applications intéressantes qui vont, peut-être, changer les télécommunications.

V.- Bien entendu. Mais, peut-être, dans notre civilisation se pose la question de la hiérarchie entre les deux aspects.

A.- Oui, mais personnellement, je ne veux pas la traiter en termes de hiérarchie; je préfère la traiter en termes de goût. C'est-à-dire qu'il y a des gens qui préfèrent l'étude de la connaissance pour la connaissance; et il y a des gens, au contraire, qui sont très fécondes et très stimulées en se posant de problèmes des applications. C'est une question de goût.

V.- Bernard d'Espagnat avait suggéré, dans l'un de ses écrits «philosophiques», que des expériences comme la votre permettaient de passer de la conviction «philosophique» sur le non-réalisme et la non-séparabilité à la certitude scientifique concernant ce sujet. Mais il ajoute quelque chose d'intéressant, à savoir: que l'information que l'on tirerait de l'expérience serait purement négative; elle nous dirait ce que la réalité n'est pas, éliminant ainsi de philosophies telles que celle de Démocrite, mais on ne pourrait pas la transformer en positive. Qu'en pensez-vous?

A.- Je ne suis pas d'accord et je vais vous dire pourquoi. Je suis d'accord sur le plan logique, c'est-à-dire, sur le plan logique il a raison: la violation des inégalités de Bell ne montre que la réalité, le monde, ou la nature (je ne sais comment l'appeler; la nature, disons), n'est pas séparable et réaliste. Donc, sur le plan de la logique il a raison. Mais, sur le plan des faits et de l'empirisme, et de l'impact que ça a sur le développement, par exemple, de l'optique quantique, et bien, ça a un impact positif. Ça a une conséquence positive et non pas négative, et je vais t'expliquer pourquoi :

Les résultats que nous avons trouvé non seulement ils violent les inégalités de Bell, mais ils sont en accord extraordinairement précis avec les prévisions de la mécanique quantique. Or, ces prévisions de la mécanique quantique ont été faites avec une situation tout à fait extraordinaire qui sont ces fameux états intriqués qui avaient été découverts par Einstein et par Schrödinger, qui sont des choses tout à fait incroyables; or, en même temps qu'on violait les inégalités de Bell, on a découvert -en fin, on a vérifié- que ces propriétés extraordinaires des états intriqués prévues par la mécanique quantique, on était capable de les mettre en évidence dans le laboratoire. Cela veut donc dire qu'on est capable de produire ces états intriqués que personne n'avait jamais vu jusque là, et de vérifier qu'ils ont bien ces propriétés extraordinaires. Résultat à partir de là: on développe tout un nouveau courant qui est quoi?: la cryptographie quantique, qui est une révolution conceptuelle dans la cryptographie. On développe la possibilité de produire des états dans un seul photon qui peuvent révolutionner les télécommunications optiques et de choses comme ça. Pourquoi? Parce qu'en faisant une expérience si pure et si délicate, on a, de façon positive, attiré l'attention sur le fait que ces états incroyables, ces états intriqués dont tout le monde disait «oui, ce sont des bizarreries de la mécanique quantique mais, en pratique, dans le monde réel on les voit jamais parce qu'il y a de la cohérence...», en fait, on a attiré l'attention sur le fait que ces états intriqués on pouvait vraiment les produire et vraiment montrer la propriété extraordinaire. Donc, en ce sens là, même si d'Espagnat a raison sur le plan logique, tout c'est qu'on a démontré n'est pas négatif; en fait, de façon empirique, on a eu un impacte extrêmement positif. Alors, je vous ai donné un exemple: cette histoire de la cryptographie quantique. C'est basé sur les inégalités de Bell, il faut quand même voir que c'est extraordinaire. La cryptographie c'est le fait de coder des messages, d'envoyer des messages secrets; donc, le code le plus bête c'est de remplacer la lettre «a» par le

nombre «1», la lettre «b» par le nombre «2»... Certes, il est facile à décoder, on a une clé du codage, etc. Avant la cryptographie quantique, le codage repose sur le fait qu'il y a une relation compliquée entre le message que je veux transmettre et puis ce qui est vraiment transmis par radio, par téléphone, etc., avec une transformation intermédiaire qui est la plus compliquée possible; et on sais bien que, si cette transformation intermédiaire n'est pas assez compliquée, et bien, avec un ordinateur, en essayant suffisamment les possibilités, on va arriver à décoder le message. Par exemple, pendant la deuxième guerre mondiale, grâce au premier calculateur, qui était certes rudimentaire, mais grâce à lui, les alliés ont pu décoder les messages de la marine allemande; ils les ont interceptés et puis, grâce à leur calculateur ils ont réussi à les décoder. Bon, jusque là, tant qu'on est dans ce chemin là, la sécurité, c'est-à-dire, l'impossibilité de décoder, repose sur une hypothèse qui est que l'adversaire n'a pas un ordinateur beaucoup plus puissant que soi. Car il peut y avoir deux façons de casser les codes, ce soit par l'ordinateur beaucoup puis puissant (s'il calcule mille fois plus vite, il va arriver à décoder rapidement) ou bien parce qu'il y a un mathématicien très astucieux qui a réussi à trouver un théorème que nous ne connaissons pas et qui a fait qu'il va pouvoir décoder le message. Donc à priori, le codage repose sur l'hypothèse que la personne, l'espion, celui dont on veut se cacher n'est pas techniquement beaucoup plus avancé que nous. Donc grosse incertitude, et c'est le fameux exemple que j'ai donné: la marine allemande ne savait pas que les américains étaient si avancés dans le domaine des calculateurs et donc qu'il se sont fait décoder leurs messages. Avec la cryptographie quantique on utilise les fameuses corrélations Einstein-Podolski-Rosen. On utilise ce pair de photons corrélés et la propriété fondamentale de ces photons corrélés, telle qu'elle a été démontrée par les tests que nous avons fait, par toutes ces expériences de violation d'inégalités de Bell, c'est la suivante: nous devons renoncer à l'idée que, lorsque les photons ont été émis, ils possédaient les polarisations, cette polarisation ne va apparaître qu'au moment où le photon 1 arrive d'un côté et le photon 2 arrive de l'autre. Mais, au moment précis où les mesures sont faites en 1 et en 2, ces polarisations acquièrent une valeur; et cette valeur, elle est la même à gauche et à droite. En d'autres termes: elle se détermine de façon aléatoire -juste avant que ça se passe on ne savait pas si ça allait être +1 ou -1 mais en revanche, au moment précis où les mesures sont faites, alors si j'ai 1 d'un côté, j'ai 1 de l'autre et si j'ai -1 d'un côté, j'ai -1 de l'autre. Donc, vous voyez, c'est extraordinaire: on se trouve en présence maintenant d'un bonhomme qu'on appelle Alice, qui est du côté 1, un autre bonhomme qui s'appelle Bob, qui est du côté 2; et les deux se trouvent avec, entre les mains, deux listes aléatoires de nombres, +1 et -1, mais ces listes sont exactement identiques. Donc l'un peut utiliser la liste pour coder le message et l'autre va pouvoir utiliser le message. Alors, vous allez me dire: qu'est-ce qui empêche un espion d'avoir vu passer le photon et d'avoir essayé de faire les mesures dessus pour trouver la clé? Mais c'est là que réside la beauté de la mécanique quantique: c'est que la mécanique quantique nous dit que la propriété que sa vaille +1 ou -1 n'existait pas avant; et si jamais quelqu'un a intercepté

le photon, a lu, il a fait une mesure de polarisation +1; puis il a réémis un photon avec exactement ce qu'il a trouvé, en croyant tromper le gens, et bien, le simple fait qu'on aie fait cette opération, c'est-à-dire, je détecte le photon, je mesure une polarisation et puis je remets 1, maintenant Alice et Bob ils ont leurs listes -1, 0, 1, 0-, ils vont prendre quelques échantillons au hasard dans leurs listes, ils vont faire un test d'inégalités de Bell et ils vont s'apercevoir que, maintenant, il ne viole plus ces inégalités. Autrement dit, la cryptographie quantique, ça fonctionne comment?: on envoie ce paire de photons, les gens font leurs mesures, ils ont toute une liste avec 1, 0, 1, 0, etc.; ils en prennent un certain nombre et ils le communiquent (par radio, ou comme on veut; tout le monde peut les écouter, il n'y a pas de problème) et ils comparent les résultats sur un certain nombre d'entre eux, et ils testent les inégalités de Bell avec ces résultats. S'ils violent les inégalités de Bell, ils sont certains que personne ne les a écouté; donc, ils sont certains que les listes qu'ils possèdent sont des listes uniques que personne n'a pas pu écouter. Or vous voyez le changement conceptuel?; cette fois-ci la garantie du secret de votre communication, elle repose non pas sur une hypothèse que la technologie de l'adversaire n'est pas très avancée: elle repose sur une loi fondamentale de la nature, liée à la mécanique quantique.

Donc, vous voyez? C'est assez incroyable! Donc, quand on dit que l'impact de ces expériences était négatif je voudrais, en montrant que ces propriétés quantiques extraordinaires on peut, vraiment, les mettre en évidence expérimentalement, les produire, les faire des sources de paires de photons, etc., on a eu un impact positif: que les gens se sont mis à penser que ces états intriqués c'étaient des choses utilisables. Que ce n'était pas un rêve des théoriciens, mais qu'on pouvait vraiment les produire et s'en servir.

V.- Le théorème de Bell se présente d'entrée sous une allure profondément abstraite; il y a une sorte de rigueur logique et désincarnée, l'on dirait presque un jeu formel. A tel point que, pour ceux qui s'y confrontent pour la première fois, la question du «lien» surgit inévitablement: qu'est-ce que tout cela a à voir avec l'affaire de la corrélation dans la polarisation de photons appartenant au même atome? Il y a là quelque chose de vraiment frappant. Des présupposés logiques élémentaires, et des présupposés concernant la nature (localité, objectivité, déterminisme) qui semblent de prime abord aussi élémentaires (presque axiomatiques au sens aristotélicien). Et tout ceci suspendu à un test expérimental qui, lui, n'a rien d'élémentaire.

Quand on fait l'histoire du problème, le rôle de John Bell apparaît toujours sous un air équivoque. D'un côté, il est indiscutable qu'il est au centre de la question; d'autre part, souvent il apparaît en quelque sorte comme un théoricien, et vous-même avez souligné quelque part qu'il raisonna surtout sur des «expériences mentales» et que le conflit qu'il a mis en évidence (contradiction entre les prédictions de la mécanique quantique et la théorie des variables cachées) est, en premier lieu, «numérique».

Ceci nous renvoie à un problème aussi vieux au moins que le pythagorisme et dont l'importance philosophique est énorme. John Bell est, en quelque sorte, un mathématicien;

et c'est de prime abord à un mathématicien qui fait penser l'équation de Schrödinger... laquelle, étant seulement un postulat, s'avère non seulement efficace à l'heure de rendre compte des faits, mais encore, dans un cas particulier, permet de retrouver des connaissances aussi vieilles que les harmonies des pythagoriciens...

D'où la question au physicien que vous êtes: les mathématiques épousent réellement la Nature?; et, en ce cas, pourquoi?

A.- Là, d'abord je dois dire que j'ai aucune compétence pour répondre à cette question. Mais j'ai le droit d'avoir une opinion en tant qu'un individu sans compétence, quand même. Mais je ne réponds pas à la question tout de suite; ce que vous avez dit sur le fait que la distinction était numérique me donne avant l'occasion quand même d'insister sur une caractéristique du théorème de Bell: si Bell avait juste démontré que la théorie de variables cachées prévoit un certain nombre et puis la mécanique quantique prévoit un autre nombre, à mon avis, il est d'une nature un peu différente qui fait que, précisément, il est susceptible d'être testé par l'expérience. Il dit qu'une certaine quantité doit être inférieure, disons, à 2, le simple fait qu'on aie mis une inégalité, une barrière, nous permet de faire une expérience, parce que si, maintenant, je fais une expérience et si je trouve 2,3, je sais qu'il faut que la précision de mon expérience soit suffisante pour distinguer entre le 2,3 et la barrière, la limite qu'a mis John Bell. Je crois que le fait que ça se présente sous forme d'une inégalité, ça veut dire qu'il faut que je trouve un résultat qui est hors de cette limite, et ça veut dire tout de suite que la question clé qui fait que mon expérience va être crédible ou ne va pas être crédible c'est quelle va être l'incertitude de mon résultat, quelle va être la précision de mon résultat; et à partir du moment où la précision sera suffisante pour que je soie tombé du bon côté de la barrière, alors le résultat est crédible. Je pense que ce n'est pas une aubaine de trouver une inégalité; ça veut dire: les résultats qui seront de ce côté de la frontière me permettront d'éliminer la totalité des théories de variables cachées locales.

Ce que je veux dire c'est que je crois que l'on peut distinguer deux types de conflits. Il y a les conflits logiques entre nombres; c'est-à-dire, on peut essayer de démontrer en logique pure, de façon abstraite, que la mécanique quantique est incompatible avec les théories à variables cachées. Et, pour cela, il suffit de trouver deux nombres qui sont différents l'un de l'autre; mais ces deux nombres peuvent être très proches. Par exemple, sur le plan de la logique pure et de l'incompatibilité théorique, si les variables cachées prévoyaient, mettons, ω , et puis la mécanique quantique prévoit 3,14, le fait que 3,14 ne soit pas égal à ω , parce que ω est un nombre irrationnel, suffirait à démontrer que les variables cachées ne sont pas tout à fait identiques à la mécanique quantique. Mais pourtant l'expérimentateur ne pourrait pas faire l'expérience; tandis que le fait que John Bell ait démontré qu'il y avait une frontière et que cette frontière était assez loin des prévisions de la mécanique quantique, donne toute la place pour faire une expérience qui ne sera jamais parfaite, qui aura certaines incertitudes. Ce qu'autorise le raisonnement de Bell c'est de dire: si votre expérience, bien non idéale, est suffisamment bonne, alors vous pouvez trancher. En mathématique pure,

3,14 n'est pas égal à ∞ ; mais, pour le physicien, vraiment 3,14 est pratiquement égal à ∞ . Donc, c'est important qu'il ait dit: les théories à variables cachées prévoient que le résultat doit être plus petit que 2, mais la mécanique quantique prévoit 2,5, etc.; mais, en fait, si votre expérience n'est pas parfaite, la mécanique quantique prévoit 2,7, mais 2,7 est toujours plus grand que 2. et si votre expérience est encore moins parfaite la mécanique quantique va prévoir 2,6; mais 2,6 c'est encore plus grand que 2. Donc il a mis une barrière et, au delà de cette barrière, on a toute la marge de la réalité des expériences. Il faut que l'expérience soit assez précise pour que son résultat tombe à droite de la barrière; mais elle n'a pas besoin d'être idéale, car l'expérience idéale ça n'existe pas. Je pense que, dans le fait qu'il y ait une inégalité, il y a un statut très particulier qui ouvre la voie à l'expérience; c'est-à-dire, ce n'est pas simplement conflit logique entre deux concepts; ça ouvre immédiatement la voie à l'expérience.

V.- Et pour la question concernant ce qui est vraiment évident pour le monde moderne, à savoir que les mathématiques épousent la réalité?

A.- Bon, d'abord je pense que c'est vraiment l'un des plus grands mystères. Pourquoi est-ce que la Nature se décrit si bien à l'aide des mathématiques? parce que je pense que, pour la plupart des philosophes, c'est évident -mais, en revanche, il ne l'est pour la plupart de nos contemporains, de nos concitoyens- que, quand on dit que les mathématiques décrivent parfaitement bien la nature, c'est non seulement que les mathématiques permettent de rendre compte, de façon scientifique, de tout ce que nous avons déjà observé, mais -ce qui est beaucoup plus extraordinaires, c'est ça qui fait le fondement de la physique- c'est que, une fois qu'on a fait une théorie, comme les équations de Maxwell qui, au XIX^{ème} siècle, rendaient compte de tous les phénomènes d'électrostatique et de magnétisme utilisés, cette théorie, à l'intérieur d'elle-même, permet de prévoir de nouveaux phénomènes: les ondes électromagnétiques, et que l'on va découvrir que ces ondes électromagnétiques existent là. Quand même, quand on lit Maxwell, et que Maxwell il écrit son traité et puis il écrit ses équations, et puis il découvre que, dans ces équations il y a la possibilité qu'il y ait une onde que si propage et il calcule à quelle vitesse elle doit se propager cette onde; et il trouve que, comme on a les constantes de l'électrostatique, il peut calculer la vitesse à laquelle doivent se propager ces ondes que personne n'a jamais vu, dont personne n'a jamais eu l'idée de ces ondes. Il calcule et il trouve: 300.000 km/s. Et là Maxwell il a cette phrase extraordinaire: «On ne peut s'empêcher de faire la relation entre cette valeur de 300.000 km/s et la valeur continue de la vitesse de la lumière». Et Maxwell dit: «C'est donc, peut-être, que la lumière est une onde électromagnétique». Mais ça, c'est extraordinaire! Je veux dire que c'est comme dans le cas de la théorie quantique, qui portait en elle les états intriqués avant que qui que ce soit ait fait la moindre mesure montrant ces phénomènes d'intrication. Donc ce qu'il y a d'extraordinaire dans ces mathématiques c'est que, non seulement elles permettent de rendre compte de tous les phénomènes, mais en plus -c'est

ça qui est de plus fascinant- c'est que ça permet de prédire de nouveaux phénomènes. On va faire les expériences et on va les observer; c'est ça qui valide les théories.

V.- Mais on va dépasser le niveau de la constatation.

A.- Alors, je crois que ça c'est le plus grand mystère qui existe. On peut faire quelques remarques; par exemple, j'ai une remarque assez naïve qui est que, après tout, peut-être que la physique se limite d'elle-même à tout ce qui est représentable par les mathématiques. C'est-à-dire que peut-être que chaque fois qu'un champ échappe à la mathématisation...; par exemple la peinture, disons, la peinture semble échapper à la mathématisation; et les physiciens disent: «...évidemment, la peinture ce n'est pas de la physique». Alors, tout ça pose le problème de la frontière; c'est-à-dire que la biologie, il y a un siècle, probablement échappait à ça, mais de plus en plus aujourd'hui la biologie va vers la mathématisation et la théorisation de plus en plus poussée. Donc la biologie est en train de rejoindre le terrain de ce qui est mathématisable.

V.- Mais, à différence de la peinture, la musique, elle est sous l'empreinte de la mathématique.

A.- Alors, effectivement, la musique c'est un cas particulier. Cela dit, je ne suis pas un spécialiste mais est-ce qu'on n'est pas victime, quand même un petit peu, d'un occidentalocentrisme? C'est-à-dire qu'il y a quand même, si je comprends bien, des musiques orientales pour lesquelles les sonorités agréables ne sont pas les mêmes que pour nous. Donc il n'y a pas le même rapport parfait entre les fréquences... oui, aujourd'hui, incontestablement, la psychologie des individus...

V.- Et pourtant, la tendance c'est à la mathématiser aussi.

A.- Oui, mais c'est une fausse mathématisation. Par exemple, il est évident que si on veut faire des enquêtes de type épidémiologique, ou de type statistique, on utilise un outil mais nous savons bien que ce n'est pas la mathématisation; on n'est pas en train de théoriser de façon mathématique. C'est comme si on disait que lorsque pour faire une enquête sur la typologie des paroles de l'individu, ce n'est pas pour autant qu'on a remplacé la psychologie par une théorie des ondes sonores. La psychologie, elle n'est pas mathématisée. Donc il y a tout un champ de ce qui existe, tout un champ du monde qui nous entoure qui, incontestablement, n'est pas représentable par les mathématiques.

V.- Vous savez quelle serait la réponse des pythagoriciens: c'est que là les mathématiques son cachées. Mais on laisse la question ouverte et on revient à John Bell. Dans l'une de ses interviews, John Bell déclarait: «On souhaiterait pouvoir avoir un point de vue réaliste sur le monde, parler du monde comme s'il était réellement là, même quand il n'a pas été observé. Moi je crois certes en un monde qui était là avant moi, et qui sera encore là après moi, et je crois que vous faites part de ce monde. Et je crois que la plupart de physiciens

adoptent ce point de vue quand ils sont mis contre le mur («when they are being pushed into a corner») par des philosophes».

Il y a quelque chose d'émouvant dans cette déclaration puisqu'on la relit quand John Bell n'est plus là...

Quand les philosophes vous pressent, la réponse réaliste serait malgré tout préférable. Mais pas en tout cas parce que le philosophe attend forcément une réponse réaliste. La question proprement métaphysique, est bien naïve et a besoin d'un court préalable.

Tout étudiant qui se voit pour la première fois confronté à la lecture de la Critique de la raison pure de Kant, dès lors qu'il commence à saisir l'enjeu réel de la question, il formule pour soi-même l'interrogation que John Bell évoque dans sa phrase: y aura-t-il encore du monde dès lors que moi (quant à ce que moi signifie, c'est encore une question) je ne serai plus là pour témoigner de sa présence? Question à la fois naïve et radicale que l'on ne saurait ne pas poser.

A.- Oui. Je crois qu'encore plus pour un physicien que pour quiconque d'autre. Parce que, en fin, il me semble bien que le physicien il choisit de faire de la physique parce qu'il pense que, quelque part, il y a une intelligibilité du monde. Autrement dit, je crois que le physicien, à priori, quand il imagine sa vie de physicien il se voit comme celui qui est extérieur et qui va ouvrir l'horloge pour comprendre comment ça se passe à l'intérieur. Donc je crois que le physicien, peut être encore plus que quiconque, a cette croyance naïve spontanée qu'il existe un monde indépendamment de lui et que lui, son rôle c'est de découvrir la façon comme ce monde fonctionne, mais en se faisant le plus petit possible; c'est-à-dire que le physicien qui observe ce monde doit être un observateur le plus discret possible. Et donc il a l'idéal que, en principe, le monde fonctionne et est là même si l'observateur n'est pas là. Alors cela dit, il faut bien se rendre compte que cette vision a du être dépassé par Heisenberg, Niels Bohr et les gens de l'école de Copenhague pour pouvoir progresser; c'est-à-dire que, conceptuellement, ces gens n'ont réussi à progresser qu'en reconnaissant qu'il y a un rôle essentiel de l'interaction entre l'observateur et le monde observé. Je n'en tire pas pour autant la conclusion que le monde n'existe pas lorsque l'observateur n'est pas là; je constate juste que, à un certain état de développement des sciences il a fallu accepter de prendre en compte l'interaction entre l'observateur et le système mesuré pour pouvoir progresser. Car la vision précédente, qui était celle de l'observateur dont le rôle pouvait se faire infiniment discret, cela bloquait la progression. Le fait qu'il ait fallu franchir cette étape et dire: attention! il n'y a pas de mesure infiniment anodine; toute mesure a un minimum d'interaction avec l'objet qui est mesuré, etc., a permis à la pensée en physique de progresser. Je n'en conclus pas pour autant que le monde n'existe pas s'il n'y a pas d'observateur... On est d'accord? Parce que, pour moi, toute trace laissée dans l'Univers est une forme d'observation. Feynman l'a très bien décrit. Il a dit: admettons qu'un bruit a lieu dans un forêt et que personne n'est là pour écouter ce bruit; est-ce que ce bruit a existé ou il n'a pas existé? Et Feynman dit: mais, attention! Ce bruit a provoqué des ondes

sonores; ces ondes sonores ont fait bouger les feuilles des arbres, ces feuilles ont peut-être fait une égratignure sur le tronc, sur la branche. Cette égratignure, elle est là, elle est marquée de façon indélébile. Donc, bien qu'il n'y a eu personne pour écouter ce bruit, ce bruit a laissé une trace quelque part; donc, ayant laissé une trace quelque part, il a existé même si personne n'était là pour l'écouter.

Dons, je veux dire que moi, je n'attribue pas un rôle particulier à l'observateur transcendantal humain. Et je vais vous dire une chose très forte et très provocante; mon photo-vérificateur, dans mon expérience, est aussi fort que le sujet transcendantal pour effectuer l'acte de mesure.

V.- D'accord. Mais, ce monde là est quand même un peu modifié. Par exemple, la non localité: est-ce que la non localité peut être considérée compatible avec la science? Question à la fois élémentaire et radicale que je puise chez René Thom: «Je compte parmi ceux qui considèrent qu'une théorie non locale ne peut même être considérée comme scientifique strictu sensu; et cela pour la raison toute évidente qu'on ne peut agir et connaître si ce n'est pas localement». La raison évoquée est effectivement «toute évidente». Einstein d'ailleurs disait quelque chose d'analogue. Y souscrivez-vous?

A.- Alors, moi je suis, premièrement, complètement séduit par cette pensée; mais la réalité de l'expérience nous oblige à accepter que le monde est plus que ça. C'est-à-dire, d'abord je crois qu'il faut rendre à Einstein une justice; c'est que, Einstein quand il pensait comme ça, il ne connaissait pas le théorème de Bell. Donc, comme je l'ai dit à un moment de cette interview, à l'époque d'Einstein on pouvait légitimement penser que cette position -c'est-à-dire, la croyance, dure comme du fer, que le monde est local, que le monde est séparable. Aujourd'hui, premièrement, nous savons que cela n'est pas vrai, et, deuxièmement, expérimentalement nous avons prouvé qu'il y a des situations qui ne peuvent pas être décrites par le concept de séparabilité naïve. Et bien, je crois que, tout simplement, c'est parce que notre concept, ce concept de séparabilité à l'Einstein, était trop naïf. Et, à chaque époque l'évolution; il faut bien admettre que le monde tel qu'il est, tel que nous l'observons dans notre laboratoire, doit être décrit par des concepts plus nuancés que ça. C'est-à-dire qu'aujourd'hui ce que nous savons c'est que le monde est local et séparable au sens de l'action directe; c'est-à-dire que, même avec les photons jumeaux, même avec les états intriqués, même avec des corrélations quantiques, je sais que, d'après tout ce que nous savons aujourd'hui, je ne peux pas tourner un bouton ici et agir instantanément, d'une façon qui se comporterait comme un signal utilisable, à l'autre bout de l'Univers. Qu'est-ce que j'appelle un signal utilisable? Tiens, on va être pragmatique: ça veut dire que je téléphone à la bourse de New York et je dis «achetez des actions» ou «vendez des actions». Non, je ne peux pas transmettre d'énergie, d'information utilisable (une information utilisable c'est une information qui peut être utilisée par mon correspondant pour prendre une décision) instantanément. Donc, en ce sens là, je préserve une certaine forme de

localité. En revanche, nous savons qu'il existe quand même dans le monde des objets non séparables, par exemple, la paire de photons jumeaux qu'on a produit au laboratoire; et cet objet se comporte comme un tout inséparable, bien que manifestement cet objet soit étalé sur de distances qui peuvent être extrêmement grandes. Les expériences de Gisin à Genève, dix kilomètres; nous c'était, il y a vingt ans, quinze mètres. Aujourd'hui dix kilomètres à Genève ou cinq cents mètres à Innsbruck. Et bien, cet objet qui manifestement a une composante à un bout et une composante à l'autre bout (et ces composantes sont séparées de quinze mètres ou cinq cents, ou de dix kilomètres) il faut pourtant que nous le considérons comme un objet non séparable; car si nous commençons à le considérer comme un objet séparable nous faisons des prédictions qui sont en contradiction avec ce que nous observons. Donc, ça veut dire que, sans doute, la notion de séparabilité il faut la raffiner. Il y a une séparabilité opérationnelle. Et celle là je pense qu'elle continue à exister: c'est-à-dire, c'est sûr qu'en tournant un bouton ici je ne peux pas, instantanément, allumer une lumière à New York, ou je ne peux pas instantanément dire aux gars, en appuyant sur le bouton, «achetez une action, faite n'importe quoi». Cette séparabilité là demeure. En revanche, si je cherche à me représenter la paire de photons inséparables, et bien, je suis obligé d'admettre qu'ils continuent à faire un tout et que je ne peux pas découper ce système en tranches. D'ailleurs ça se voit sur le formalisme: le formalisme quantique ne me permette pas, pour cette paire des photons corrélés, de les couper en deux et dire que, d'un côté, il y a un objet qui a une propriété et, de l'autre côté, un autre objet qui a une autre propriété. Donc la non séparabilité c'est de dire: j'ai un seul objet unique, cet objet a une propriété globale et je ne peux pas attribuer une propriété en particulier à l'un ou à l'autre, bien que ces objets soient étalés sur dix kilomètres.

V.- Dans l'un des entretiens que vous avez accordé, à la question «qu'aurait-il Einstein à dire de tout ceci s'il était vivant?», vous vous êtes détourné en soutenant que ce qu'il trouverait à dire serait certainement fort intelligent. D'autres sont un peu moins prudents. Parlant des tests de l'équipe Gisin à Genève quelqu'un a titré quelque part: «Einstein loses in photon test». John Bell lui-même, qui pendant longtemps semble avoir avancé ses propos avec beaucoup de prudence, au moins dans les formes, n'hésite pas vers ses dernières années à proclamer la nécessité de revenir à une situation pré-relativiste ou, pour mieux dire, à une relativité pré-einsteinienne.

La question, du moins du point de vue des mythes configureurs des dispositions philosophiques est essentielle; car Einstein est quelque chose de plus qu'un scientifique dont les théories auraient des implications philosophiques. Einstein est, en quelque sorte, un Picasso de la science, quelque chose de plus qu'un scientifique; il est une référence de base et joue le rôle symbolique d'un tabou.

Mais, quelle que soit «l'issue» que l'on veuille avancer à vos tests, la chose semble fatalement lourde de conséquences pour Einstein; et, avec lui, pour pratiquement le

fonds commun de penseurs aussi différents que Descartes et Aristote, dont le principe de contiguïté semble profondément ébranlé.

Bref, je vous repose la question en changeant un peu les termes: pourrait Einstein dire quelque chose, après le théorème de Bell et les résultats de votre test, qui ne soit pas une déroboade?

A.- Ce n'est pas sûr qu'il aurait trouvé une réponse. Mais, après tout, est-ce que l'histoire de la pensée ne nous a pas montré des situations analogues à ça? Je veux dire que quand Bergson -je crois que Bergson était quelqu'un d'intelligent- ne pouvait pas accepter que le temps ne soit pas une notion absolue et ne pouvait donc pas accepter la relativité du temps; Bergson a pensé démontrer que la relativité était impossible parce qu'il n'acceptait pas la paradoxe des jumeaux. Toute personne, aussi intelligente soit-elle, peu à un certain moment se trouver bloquée; donc personne ne peut savoir si Einstein aurait dépassé cela et réussi à trouver quelque chose d'extraordinaire. Comme vous avez dit, Picasso a eu plusieurs périodes dans sa vie; mais s'il n'avait pas eu une période bleue, une période rose, on ne saurait pas qu'il y a eu plusieurs périodes dans sa vie. Peut-être que Einstein, à la lumière du théorème de Bell, aurait imaginé autre chose; mais nous ne le savons pas.

V.- Mais s'il avait imaginé autre chose, il aurait été obligé quand même de remettre en question des présupposés essentiels.

A.- Mais je ne sais pas, si ce sont de présupposés essentiels. Disons que le réalisme séparable, tel qu'il avait été formulé, il fallait qu'il le remette en cause; mais peut-être qu'il aurait trouvé une forme de réalisme séparable qui aurait été moins stricte que celle qu'il avait énoncé et qui aurait été acceptable. Après tout, il y a des voies de sortie formelles. Par exemple, si vous acceptez de vous placer dans un espace autre que l'espace réel, que l'espace à trois dimensions, le monde redevient séparable; dans un espace de configuration à six dimensions vous retrouvez la localité pour ces états intriqués. Simplement, la localité dans un espace à six dimensions je ne la comprends pas; parce que, quand j'essaye de replonger dans un espace à trois dimensions ça redevient non local. Mais il n'empêche que, formellement, à six dimensions on retrouve la localité. Vous avez des gens comme Feynman qui ont pu écrire -mais je ne sais pas s'ils y croyaient- des articles montrant qu'il est logiquement possible avoir de voies de sortie qui consistent à accepter les probabilités négatives; si on accepte les probabilités négatives on sauve la localité.

V.- Mais vous même, la probabilité négative, ça ne vous choque pas?

A.- Ça me choque totalement. c'est complètement incompatible, parce que si un événement se produit dans mon laboratoire et qu'il a une probabilité négative, ça veut dire que, des résultats déjà trouvés, on va en effacer un; dire qu'un résultat se produit avec une probabilité négative c'est dire qu'il est effacé du reste de l'Univers. Donc, pour moi, ça n'a pas de sens (un événement qui a eu lieu, il a eu lieu; on ne peut pas l'effacer de l'Univers).

Pas plus que la localité à six dimensions, pour moi, c'est n'est pas une solution, mais il y a des sorties formelles. Alors il y a deux sortes d'issues pour le problème; il y a soit des issues formelles, tel que celles que je suis en train de vaguement énoncer, ou des issues empiriques, qui consistent à dire (c'est ce que j'ai dit tout à l'heure): attention!, la localité sur le plan empirique, n'est pas violée. Je ne peux pas -parce que ça, c'est facile à démontrer avec la mécanique quantique- bien que ces états soient non séparables, encore une fois je répète, on peut démontrer qu'il n'est pas possible de les utiliser pour transmettre de l'énergie, ou même une information utilisable, instantanément à l'autre bout de l'Univers. On peut démontrer qu'il n'est pas possible de s'en servir. Autrement dit, elle est là, elle est donnée, cette non localité, cette non séparabilité; mais je n'y ai pas accès, je ne peux pas m'en servir. C'est extraordinaire! Bon, vous pouvez vous en servir en disant: empiriquement, la séparabilité n'est pas violée; je ne peux pas transmettre des messages à l'autre bout de l'Univers de façon instantanée.

V.- Venons à une toute autre affaire. Les particules de la mécanique quantique répondent à des propriétés statistiques, que ce soit dans une statistique du type Fermi-Dirac, ou d'une statistique type Einstein. Ces particules ne sont pas, par exemple, susceptibles d'être déterminées (donc partiellement identifiées) par leur trajectoire. La question -certes, pas nouvelle- se pose donc du statut ontologique des particules en question. Sont-elles soumises à un quelconque principe d'individuation?

Il est vrai que le principe d'individuation aristotélicien avait déjà été fortement ébranlé par la physique classique (comme le dit Thom, identifier l'énergie, l'actualité de l'être en puissance, n'est pas la même chose que décrire mathématiquement la courbe analytique). Mais, cependant, des concepts comme la non localité semblent effacer toute trace de référence à l'individuel. Faudrait-il, avec Pauli, conclure à la nécessité de «sacrifier l'individuel unique et son 'sens' à fin de sauver une description objective et rationnelle des phénomènes»?

A.- A mon avis la réponse est: oui. Mais, sur le plan purement factuel, je crois qu'il faut ne pas mélanger les problèmes; c'est-à-dire que, dans les expériences que nous avons faites, le principe de Pauli ne joue pas. Car les deux photons que s'en vont des deux côtés sont différents, ils sont distinguables, n'ont pas la même énergie, n'ont pas la même couleur; je peux les distinguer en mettant un filtre violet d'un côté et un filtre vert de l'autre. Donc, ce n'est pas le principe d'indiscernabilité qui est à l'œuvre dans les expériences que nous avons faites. Néanmoins, maintenant je vais répondre à l'autre question: je crois, effectivement, qu'il y a une autre difficulté, que c'est là une révolution conceptuelle essentielle de la mécanique quantique, que cette indiscernabilité des particules identiques; c'est-à-dire le fait que tous les électrons soient identiques, strictement identiques, soient tellement identiques que, lors qu'on a écrit la fonction d'onde de deux électrons elle est totalement symétrisée, ou antisymétrisée, par rapport à eux. C'est-à-dire qu'on ne peut plus dire: il y a un électron 1

ou un électron 2; le formalisme fondamentalement ne fait plus la distinction entre les deux. Je crois que ça permet de répondre: oui, à la question que vous avez posée; que crois que le formalisme quantique, lorsqu'il traite de particules indiscernables, oblige profondément à renoncer à l'individuation des objets. Je crois qu'on ne peut pas imaginer, même par la pensée, qu'on donne une petite étiquette, en disant: ça c'est l'électron numéro 1, qu'au c'est l'électron numéro 2. Et ceci à des conséquences observables: ces sont les fameuses statistiques quantiques, celle de Fermi-Dirac ou de Bose-Einstein. Ça a, là encore, des conséquences observables. Lorsqu'on fait une statistique de Fermi-Dirac, ou lorsqu'on fait une statistique de Bose-Einstein, on ne décompte pas les probabilités de la même façon qu'on les décompterait en disant: l'électron numéro 1 et l'électron numéro 2, certes ils se ressemblent beaucoup, mais ils sont un tout petit peu différents. La meilleure preuve: si j'avais l'électron numéro 1 et l'électron numéro 2, ou si ça avait un sens de parler de l'électron numéro 1 et l'électron numéro 2, lorsque je compterais les possibilités qu'il y a de les répartir, je pourrais dire: le 1 à gauche et le 2 à droite, une possibilité; et le 2 à droite et le 1 à gauche, une autre possibilité. Donc, si je me pose la question: combien y a-t-il de façons de répartir ces deux électrons dans deux boîtes?, je dirai qu'il y a deux possibilités, l'un à gauche et l'autre à droite, ou bien le numéro 1 à droite et le numéro 2 à gauche. Or, en physique quantique je dis: le numéro 1 à gauche et le numéro 2 à droite c'est strictement la même chose que le numéro 1 à droite et le numéro 2 à gauche. Et donc, comme c'est strictement la même chose, je le compte pour une seule possibilité. Et c'est en faisant des décomptes de ce type là que je rencontre de la conductivité dans les métaux, ou je rencontre des propriétés de l'énergie hyperfluide. Donc, là encore il y a des conséquences observables; ça n'a rien à voir avec la non localité et tout ça, mais je crois que c'est aussi un des points qui est très violemment remis en cause par la mécanique quantique par rapport aux concepts classiques. Et je voudrais, à ce propos, faire une remarque qui n'a rien à voir avec, qui est la suivante; c'est Norman Ramsey, prix Nobel de physique pour des mesures extrêmement précises, qui a fait remarquer la chose suivante: le fait qu'on perd son individualité, ça fait que les étalons que nous avons aujourd'hui sont des étalons universels, non pas des artefacts. Car, enfin, pourquoi est-ce qu'on peut se permettre de dire que la seconde est définie à partir d'une certaine vibration dans l'atome de césium?; c'est parce que, implicitement, nous avons accepté que tous les atomes de césium de l'Univers sont strictement identiques entre eux. Car si nous n'avions pas accepté l'idée que tous les atomes de césium de l'Univers sont identiques entre eux, nous ne dirions pas que le diapason qui constitue l'étalon de temps fondamental c'est: prenez un atome de césium et mesurez telle transition; nous dirions: prenez l'atomes de césium qui est déposé à Paris... Mais celui là il n'est peut-être pas tout à fait identique à celui des américains ou des anglais ou des russes. Tandis qu'aujourd'hui, on ne dit pas: prenez l'atome de césium qui est à Paris; on dit: prenez un atome de césium, mesurez telle transition et vous avez l'étalon de temps. Et ça c'est une remarque fondamental de Norman Ramsey: tous les étalons

modernes reposent sur la croyance profonde que les particules identiques sont vraiment indiscernables. C'est une croyance aujourd'hui; peut-être un jour on la remettra en cause. Mais toute la physique moderne repose là dessus, sur le fait que l'atome de césium de paris, ou de Moscou, ou qui est sur alpha du Centaure, ou ailleurs, ils sont tous identiques; et que si on entre en communication avec les gars là-bas, on leur dit: et bien, voilà, nous, notre horloge atomique elle marche comme ça, prenez un atome de césium, faites comme ça et puis vous aurez le même horloge que nous. Vous n'aviez pas réfléchi à ça; moi non plus jusqu'à ce que Norman Ramsey nous fasse cette conférence. Avant il y avait des artefacts. On disait: le mètre c'est le truc à platine iridié qui est déposé... et c'est la distance entre les deux traits de cet artefact qui est déposé là. Mais aujourd'hui on dit plus ça. Vous voyez que c'est une autre question qui n'a rien à voir avec nos expériences, je me permets de dire; mais, à mon avis, c'est une question qui est vraiment révolutionnée par la physique moderne.